

**Д. А. Романов<sup>1\*</sup>, М. А. Степиков<sup>1</sup>, Е. А. Гаевой<sup>1</sup>, С. Ю. Пронин<sup>1</sup>,  
Ю. Ф. Иванов<sup>2,3</sup>, О. С. Толкачев<sup>2,3</sup>, В. Е. Громов**

<sup>1</sup>Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

<sup>3</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск

\*romanov\_da@physics.sibsiu.ru,

Научный руководитель – проф., д-р техн. наук Е. В. Протопопов

## СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ СИСТЕМЫ «ПОКРЫТИЕ Ag–CdO / МЕДНАЯ ПОДЛОЖКА», СФОРМИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНЫМ МЕТОДОМ

На медных электрических контактах контакторов серии КПВ-605 сформированы электровзрывные покрытия Ag–CdO. Методом просвечивающей электронной микроскопии изучены их фазовый состав, морфология и дефектная субструктура. Исследования показали, что полученные покрытия относятся к нанокристаллическим материалам.

*Ключевые слова:* электровзрывное напыления, композиционные покрытия, серебро, оксид кадмия, структура.

**D. A. Romanov, M. A. Stepikov, E. A. Gaevoj, S. Ju. Pronin, Ju. F. Ivanov,  
O. S. Tolkachev, V. E. Gromov**

## STRUCTURAL-PHASE STATE OF THE SYSTEM "COATING Ag–CdO / COPPER SUBSTRUCTION", GENERATED BY ELECTRONIC OPERATING METHOD

Electro-explosive coatings of Ag–CdO are formed on copper electrical contacts of KPV-605 series contactors. Transmittance electron microscopy was used to study their phase composition, morphology, and defect substructure. Studies have shown that the coatings obtained relate to nano-crystalline materials.

*Keywords:* electrospray coating, composite coatings, silver, cadmium oxide, structure.

Объектом исследований являлись электрические контакты контакторов серии КПВ-605, на поверхности которых электровзрывным методом было сформировано покрытие системы Ag–CdO. В качестве взрываемого токопроводящего материала была использована фольга серебра, на поверхность которой в область взрыва помещалась навеска порошка CdO. Фазовый состав, морфологию и дефектную субструктуру покрытия и прилегающего слоя подложки анализировали методами

просвечивающей электронной дифракционной микроскопии (прибор JEM-2100F, JEOL). Фольги для исследования материала методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии изготавливали методом ионного утонения тонких ( $\approx 100$  мкм) пластинок, расположенных в поперечном сечении образца. Это позволяло исследовать структуру покрытия и переходного слоя, разделяющего покрытие и подложку. Ионное утонение пластинок осуществляли на приборе Ion Slicer EM 09100IS.

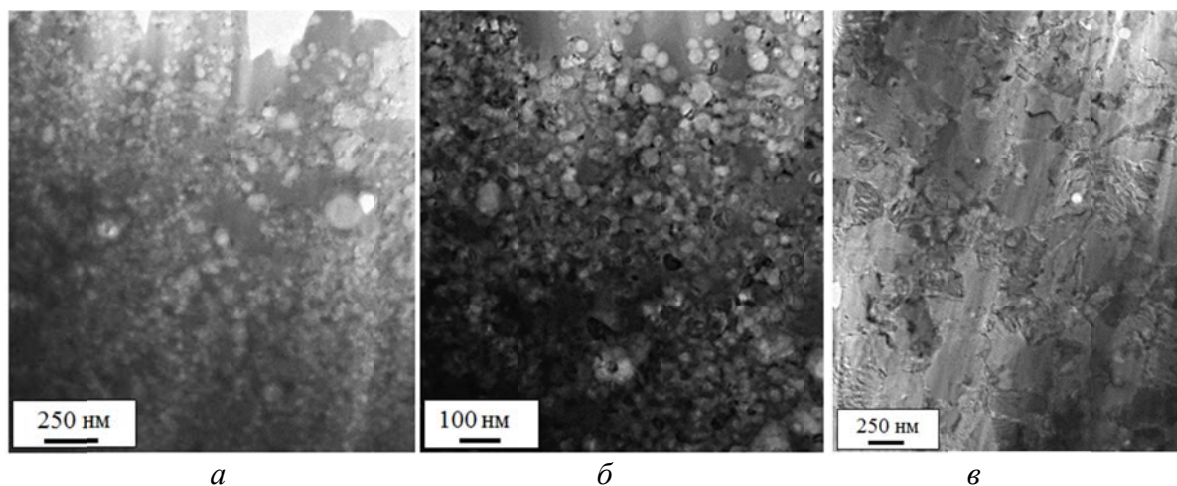


Рис. 1. Структура покрытия Ag–CdO (*а*, *б*) и слоя меди, прилегающего к границе раздела покрытия и подложки (*в*)

Характерное электронно-микроскопическое изображение покрытия и слоя меди, прилегающего к покрытию, приведено на рис. 1. Покрытие Ag–CdO, сформированное на поверхности образца меди электровзрывным методом, имеет нанокристаллическое строение (рис. 1, *а*, *б*). Размер кристаллитов изменяется в пределах от 20 нм до 50 нм. Слой меди, прилегающий к покрытию, имеет поликристаллическое строение. Размер кристаллитов изменяется в пределах от 200 нм до 400 нм (рис. 1, *в*). Можно предположить, что субмикрокристаллическая зеренная структура прилегающего к покрытию слоя меди сформировалась как в результате протекания высокоскоростной кристаллизации, так и процесса динамической рекристаллизации, инициированных термомеханическим воздействием потока плазмы, образовавшегося при электрическом взрыве проводника, на поверхность образца меди.

По мере удаления от поверхности раздела покрытия и подложки дефектная субструктура меди существенным образом изменяется (рис. 2). В слое, расположенном на расстоянии  $\approx 90$  мкм от границы с покрытием Ag–CdO в объеме зерен наблюдается фрагментированная субструктура, характерная для сильно деформированной меди (рис. 2, *а*).

В объеме фрагментов выявляется дислокационная субструктура, сформированная хаотически распределенными дислокациями. Скалярная

плотность дислокаций составляет  $0,8 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ . В слое, расположенном на расстоянии  $\approx 170 \text{ мкм}$  наблюдается полосовая дислокационная субструктура и разориентированная ячеистая субструктура (рис. 2, б). При удалении от границы раздела системы «покрытие Ag–CdO / медная подложка» на расстояние  $\approx 220 \text{ мкм}$  в объеме зерен меди наблюдается ячеистая дислокационная субструктура и (рис. 2, в) и субструктура ориентационного хаоса (рис. 2, г). Электровзрывное формирование покрытия состава Ag–CdO сопровождается существенным деформационным воздействием на поверхность образца. По мере удаления от поверхности образца степень деформирования материала снижается.

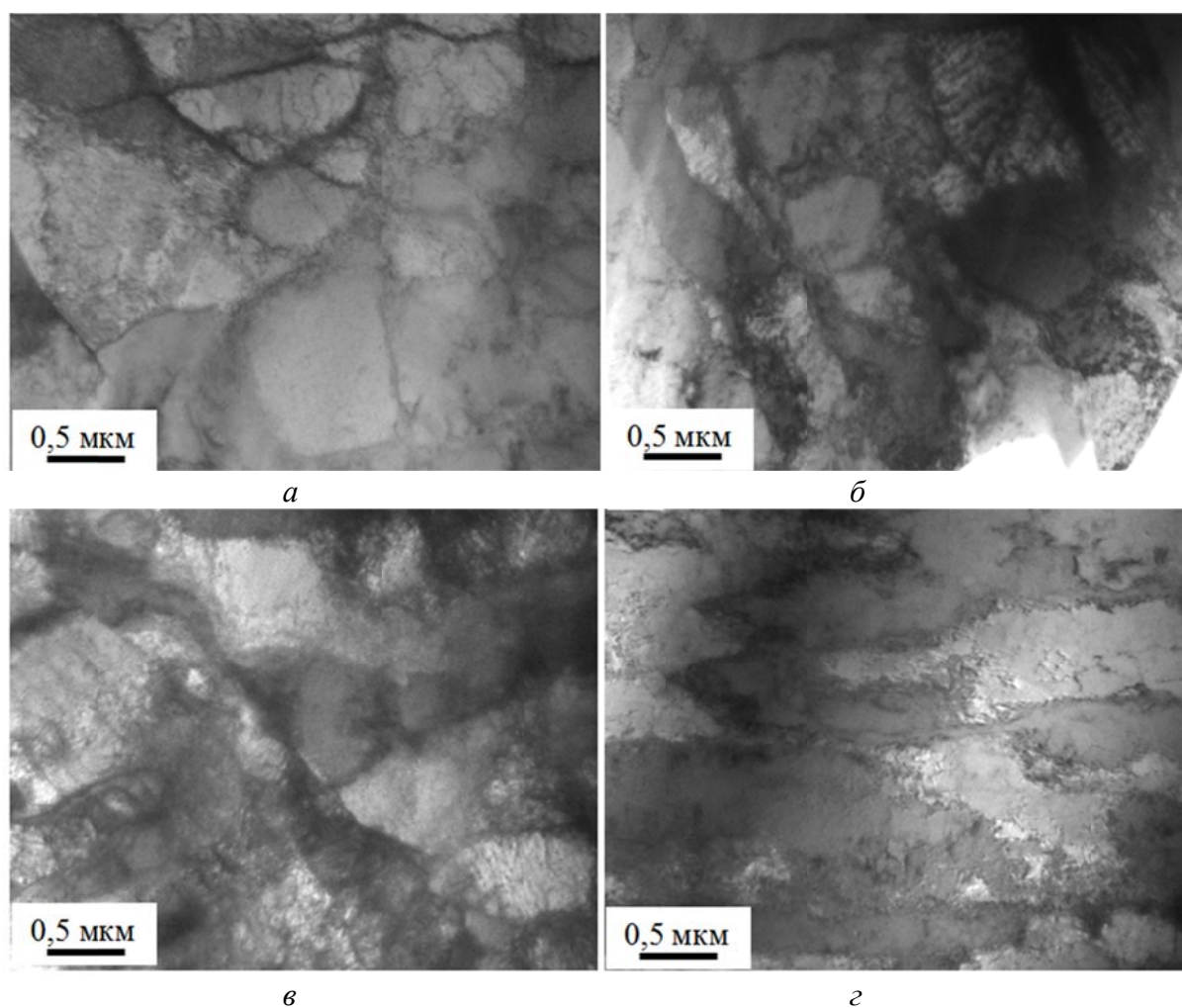


Рис. 2. Структура медной подложки в слоях, находящихся на расстоянии  $\approx 90 \text{ мкм}$  (а);  $\approx 170 \text{ мкм}$  (б);  $\approx 220 \text{ мкм}$  (в, г) от границы с покрытием Ag–CdO

Фазовый состав материала анализировали методами дифракционной электронной микроскопии, используя методику темнопольного анализа и методику индирования микроэлектронограмм. На рис. 3 приведены результаты электронно-микроскопического микродифракционного анализа фазового состава покрытия, сформированного на меди электровзрывным методом. Отчетливо видно, что микроэлектронограмма (рис. 3, б),

полученная с участка покрытия, электронно-микроскопическое изображение которого приведено на рис. 3, *а*, является кольцевой, что подтверждает сделанные выше выводы о нанокристаллической структуре покрытия.

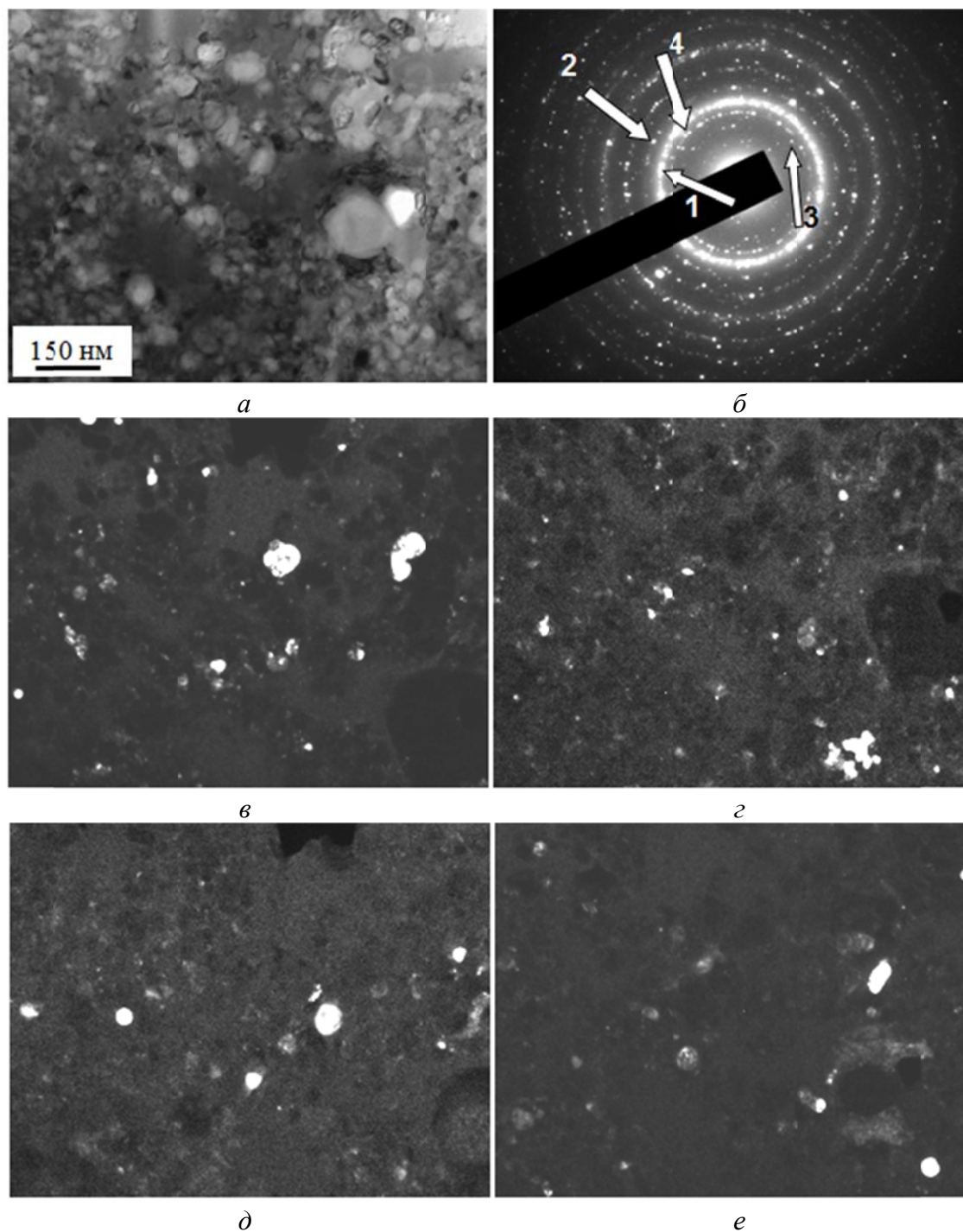


Рис. 3. Структура покрытия Ag–CdO, сформированного на поверхности меди электровзрывным методом; *а* – светлое поле; *б* – микроэлектроннограмма, стрелками указаны рефлексы, в которых получены темные поля (*в–е*), соответственно; *в–е* – темные поля, полученные в рефлексах  $[111]\text{Cu} + [973]\text{Cd}_3\text{Cu}_4$  (рефлекс 1),  $[002]\text{Cu} + [151]\text{Ag}_2\text{O}_3$  (рефлекс 2),  $[200]\text{CdO}_2$  (рефлекс 3),  $[953]\text{Cd}_3\text{Cu}_4$  (рефлекс 4), соответственно

Индицирование микроэлектроннограммы (рис. 3, б) показывает, что покрытие является многофазным. На микроэлектроннограмме выявляются рефлексы следующих фаз: Cu;  $\text{Cd}_3\text{Cu}_4$ ,  $\text{Ag}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CdO}_2$ , а также CuO. Метод темнопольного анализа позволил определить форму и размеры кристаллитов выявленных фаз. Установлено, что кристаллиты фаз имеют преимущественно округлую (глобулярную) форму; размеры кристаллитов меди изменяются в пределах от 20 нм до 50 нм; размеры включений  $\text{Cd}_3\text{Cu}_4$  – в пределах (30–40) нм; размеры включений  $\text{CdO}_2$  – в пределах (15–50) нм; размеры включений  $\text{Ag}_2\text{O}_3$  – в пределах (5–10) нм. Прилегающий к покрытию слой меди также является многофазным. Индицирование микроэлектроннограммы, полученной с данного объема материала, позволило выявить рефлексы следующих фаз: Cu;  $\text{Ag}_5\text{Cd}_8$  и  $\text{Cd}_3\text{Cu}_4$ . Размер кристаллитов меди изменяется в пределах от 200 нм до 400 нм. Включения частиц вторых фаз располагаются преимущественно вдоль границ зерен меди и имеют глобулярную форму либо форму тонких прослоек.

### **Заключение**

Методами электронной дифракционной микроскопии проведены исследования фазового состава, дефектной субструктуры и морфологии фаз системы «покрытие Ag–CdO/медная подложка», сформированной на поверхности образцов меди электровзрывным методом. Выявлено образование многоэлементного многофазного покрытия, имеющего нанокристаллическую структуру. Установлено, что основными фазами покрытия являются Cu,  $\text{Cd}_3\text{Cu}_4$ ,  $\text{Ag}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CdO}_2$ ,  $\text{Cd}_3\text{Cu}_4$ . Обнаружено, что объем меди, прилегающий к покрытию, имеет субмикрокристаллическую зеренную структуру, что может свидетельствовать как о протекании в данном слое высокоскоростной кристаллизации, так и процесса динамической рекристаллизации. Выявлен эффект дисперсионного твердения слоя меди, прилегающего к покрытию, обусловленного образованием наноразмерных фаз состава  $\text{Ag}_5\text{Cd}_8$ ,  $\text{Cd}_3\text{Cu}_4$ , Cd и CuO. Показано, что электровзрывное формирование покрытия состава Ag–CdO сопровождается термо-деформационным воздействием на поверхность образцов меди с образованием градиента дислокационных субструктур. Обнаружено, что по мере удаления от поверхности образца степень деформирования материала снижается.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-32-60032 мол\_а\_дк и при финансовой поддержке Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-1118.2017.2, а также при частичной финансовой поддержке комплексной программы СО РАН в рамках программы фундаментальных исследований РАН «Наноструктуры: физика, химия, биология, основы технологий» (проект № 0366-2015-0005).*